



## Evaluation of the evaporation estimation approaches based on solar radiation

Rim, Chang-Soo<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University, 154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Korea

Paper number: 15-099

Received: 1 December 2015; Revised: 14 December 2015 / 29 December 2015; Accepted: 29 December 2015

### Abstract

In order to examine the applicability, the evaporation estimation approaches based on solar radiation are classified into 3 different model groups (Model groups A, B, and C) in this study. Each group is tested in the 6 study stations (Seoul, Daejeon, Jeonju, Busan, Mokpo, and Jeju). The model parameters of each model group are estimated and verified with measured pan evaporation data. The applicability of verified model groups are compared with results of Penman (1948) combination approach. Nash-Sutcliffe (N-S) efficiency coefficients greater than 0.663 in all study stations indicate satisfactory estimates of evaporation. On the other hand, in the model verification process, N-S efficiency coefficients greater than 0.526 in all study stations indicate also satisfactory estimates of evaporation. However, N-S efficiency coefficients in all study cases except Model groups B and C in Busan are less than those of Penman (1948) combination approach. Therefore, it is concluded in this study that the evaporation estimation approaches based on solar radiation have capability to replace Penman (1948) combination approach for the estimation of evaporation in case that some meteorological data (wind speed, relative humidity) are missing or not measured.

**Keywords:** Evaporation, Solar radiation, Model parameter, Penman evaporation

## 일사량에 기초한 증발량 산정방법들의 적용성 평가

임창수<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>경기대학교 공과대학 토목공학과

### 요 지

본 연구에서는 일사량에 기초한 증발량 산정방법의 적용성을 검토하기 위해 기존에 연구자들에 의해서 제안된 식들을 3가지 형태의 model group (Model groups A, B, and C)으로 분류하고, 이를 우리나라 6개 지역(서울, 대전, 전주, 부산, 목포, 제주)에 적용하였다. 증발접시 증발량 자료를 이용하여 이들 model group들의 매개변수를 추정하고, 검증하였다. 또한 Penman (1948) 조합식을 적용하여 이들 model group들과 비교하였다. 연구결과에 의하면 모든 지역에서 Nash-Sutcliffe (N-S) 효율지수가 0.663 이상을 보여서 만족스러운 증발량 산정결과를 보였다. 모형 검증과정에서 산정된 N-S 효율지수는 모든 연구지역에서 0.526 이상을 보여서 역시 만족스러운 결과를 보였으나, 부산지역에서 적용된 Model groups B와 C를 제외하고는 모두 Penman (1948) 조합식보다 작은 N-S 효율지수를 보였다. 따라서 주요 기상자료 일부(풍속, 상대습도)가 부족하거나 측정되지 않는 경우에 증발량 산정을 위해서 Penman (1948) 조합식을 대체하여 일사량자료에 기초한 증발량 산정 방법이 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

**핵심용어:** 증발, 일사량, 모형 매개변수, Penman 증발

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-249-9740  
E-mail: csrim@kgu.ac.kr (C.-S. Rim)

## 1. 서론

최근 기후변화에 따른 기온증가는 증발량을 증가시키는 주요 원인으로 분석되고 있다(IPCC, 2007). 이러한 기후변화에 따른 증발량의 증가는 지역적으로 기문을 촉진하는 결과를 초래한다. 따라서 지역에 따라 정확한 증발량의 변화를 파악하는 것은 필요하다. 하지만 증발량에 영향을 미치는 기후요소는 다양하며 주로 기온, 풍속, 상대습도, 일사량 등이 주요 기상인자로 작용한다. 하지만 이들 기상인자의 경우 각 지역별로 관측이 이루어지지 않는 경우가 있고, 관측을 위해 많은 시간과 경비가 소요되는 것도 사실이다. 따라서 많은 연구자들은 이들 기상요소 모두를 필요로 하지 않고 증발량을 산정할 수 있는 방법을 연구해 왔고, 다양한 방법들이 제시된 바 있다.

기상자료를 이용하여 증발산량을 산정하는 방법들 중에서 가장 구체적인 기상자료를 필요로 하는 증발산량 산정 방법은 조합식(combination approaches)으로서 에너지수지(energy budget)와 공기동력학적 방법(mass transfer)을 조합한 방법이다(Penman, 1948; Priestley-Taylor, 1972; DeBruin, 1978; DeBruin and Keijman, 1979; Brutsaert and Stricker, 1979). 또한 Penman 조합식(1948)으로부터 증발표면으로부터의 증발을 억제하는 저항의 개념을 도입한 방법이 제안된 바 있다(Monteith, 1965; Shuttleworth and Wallace, 1985; Allen et al., 1998; Lagoes et al., 2011). Kohler et al. (1955)은 조합식의 에너지수지항과 공기동력항을 경험적인 방법으로 최적화하여 수표면에서의 증발량 산정식을 제안한 바 있고, 우리나라에서 적용된 바 있다(Jo, 1973). Lee and Kim (1985)은 우리나라 증발량의 시공간적 분석을 위해 Kohler and Richards (1962)식을 적용한 바 있다.

에너지수지를 이용한 방법은 지표면이나 저수지 수면에서 발생하는 에너지수지를 이용하여 증발산량을 산정하는 방법이다(Lenters et al., 2005; Gianniou and Antonopoulos, 2007; Delclaux et al., 2007). 공기동력학적 방법은 가장 오래된 증발량 산정방법 중에 하나로서 Dalton(1802)의 법칙에 근거하고 있으며, 증발표면으로부터 대기 중으로 수분입자의 확산이 동 현상을 모형화하여 증발량을 산정하는 방법이다(Rohwer, 1931; Konstantinov, 1968; Jensen, 1973). 비교적 단순한 형태의 식으로 표현되고, 상대적으로 적은 기상관측자료를 필요로 한다. Han and Lee (2006)는 해남 농경지에서 관측된 대형 증발접시 증발량을 이용하여 공기동력학적 방법의 매개변수를 추정한 바 있다.

또한 에너지수지나 공기동력학적 방법 이외에 기온자료만

을 이용한 경험적인 방법(Thornthwaite, 1948; Blaney and Criddle, 1950; Papadakis, 1961)과 일사량자료를 이용한 경험적인 방법이 있다(Makkink, 1957; Jensen and Haise, 1963; Stephens and Stewart, 1963; McGuinness and Bordne, 1972; Doorenbos and Pruitt, 1977; Hargreaves and Samni 1982, 1985; Abtew, 1996). 본 연구에서는 증발량에 미치는 기후요소 중의 하나인 일사량에 기초하여 증발량을 산정하는 방법을 검토하였다. 과거 제시된 식들을 적용하여 증발량을 산정할 수 있는지를 파악하기 위해 증발접시 증발량 자료를 이용하여 이들 식들의 매개변수를 추정하고 이를 검증하여 적용성을 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구 지역 및 자료

본 연구에서 사용하는 기상자료는 기상청에서 관리하는 우리나라 전국에 위치한 6개 기상관측지점이고, 자료기간은 서울(1974~2014), 대전(1984~2014), 전주(1982~2014), 부산(1981~2014), 목포(1973~2014), 제주(1982~2014)이다. 이들 자료기간을 전반부와 후반부 두 다른 기간으로 구분하여 증발식 매개변수 검증을 위해 자료기간의 후반부 자료(서울, 1996~2014; 대전, 1999~2014; 전주, 2003~2014; 부산, 1998~2014; 목포, 1994~2014; 제주, 1998~2014)를 적용하였고, 증발식 검증을 위해 자료기간의 전반부 자료(서울, 1974~1995; 대전, 1984~1998; 전주, 1982~2002; 부산, 1981~1997; 목포, 1973~1993; 제주, 1982~1997)를 적용하였다. 본 연구에 활용된 기상자료는 월평균 일사량으로서, 증발접시 증발량, 일사량, 기온, 풍속, 상대습도 등이다.

### 2.2 일사량 자료 기반 증발량 산정식

본 연구에서는 일사량자료에 기초한 식이 적용되었다(e.g., Makkink, 1957; Jensen and Haise, 1963; Stephens and Stewart, 1963; McGuinness and Bordne, 1972; Hargreaves, 1975; Doorenbos and Pruitt, 1977; Abtew, 1996). 이 식들을 형태에 따라서 3개의 Model groups A, B, C로 구분하였으며, Model group A에는 Abtew (1996)의 식, Model group B에는 Jensen and Haise (1963)식, Hargreaves (1975)의 식, Stephens and Stewart (1963)식 그리고 McGuinness and Bordne (1972)의 식, Model group C에는 Makkink (1957)식과 Doorenbos and Pruitt (1977)의 식이 포함되었다. 또한 Penman (1948)의 조합식을 적용하여 각각의 model group과 비교하였다.

## 2.2.1 Model group A

Abtew (1996)는 증발산량 산정식으로 다음과 같은 간략한 식을 제안하였다.

$$k \frac{R}{\lambda} \quad (1)$$

여기서  $E$ 는 증발산량(mm/day),  $R_s$ 는 일사량(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $\lambda$ 는 무차원계수(MJ/kg)이다.

## 2.2.2 Model group B

Jensen and Haise (1963)는 증발산량 산정식으로 다음 식을 제안하였다.

$$E = a(T_a - b)R_s \quad (2)$$

여기서  $E$ 는 증발산량(mm/day),  $T_a$ 는 기온(°C),  $R_s$ 는 일사량(mm/day),  $a$ 는 온도상수(=0.025)로서 지역에 따라 다른 값을 갖고,  $b$ 는 섭씨온도인 경우 -3을 적용하였다. 또한 Hargreaves (1975)는 미국 캘리포니아 Davis에서 관측된 lysimeter 자료를 이용하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$E = a(T_a + b)R_s \quad (3)$$

여기서  $E$ 는 증발산량(mm/day),  $T_a$ 는 기온(°C),  $R_s$ 는 일사량(mm/day),  $a=0.0135$ ,  $b=17.8$ 이다.

Stephens and Stewart (1963)는 Florida 지역에서 잔디로부터 증발산량을 산정하기 위해 다음 식을 제안한 바 있다.

$$E = (aT_a - b)R_s \quad (4)$$

여기서  $E$ 는 증발산량(mm/day),  $T_a$ 는 기온(°F),  $R_s$ 는 일사량(W/m<sup>2</sup>),  $a$ 는 0.000287,  $b$ 는 0.00664이다. McGuinness and Bordne (1972)는 Florida에서 관측된 lysimeter 자료를 이용하여 증발산량을 산정하는 식을 제안하였다.

$$E = (aT_a - b)R_s \quad (5)$$

여기서  $E$ 는 증발산량(mm/day),  $T_a$ 는 기온(°F),  $R_s$ 는 일사량(W/m<sup>2</sup>),  $a$ 는  $6.74 \times 10^{-6}$ ,  $b$ 는  $1.56 \times 10^{-4}$ 이다.

## 2.2.3 Model group C

Makkink (1957)는 네덜란드의 잔디조건에서 10일 이상기간에 대한 증발산량 산정식 Eq. (6)을 제안하였다.

$$E = a \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma} - b \quad (6)$$

여기서  $E$ 는 증발산량(mm/day),  $R_s$ 는 일사량(mm/day),  $\Delta$ 는 포화증기압과 온도관계 곡선기울기(mb/°C),  $\gamma$ 는 건습계 상수(mb/°C),  $a$ 는 0.61,  $b$ 는 0.12이다. Doorenbos and Pruitt (1977)는 일사량자료를 이용하여 증발산량을 산정하기 위해 다음 식을 적용하였다.

$$E = a \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma} + b \quad (7)$$

$$a = 1.066 - 0.13 \times 10^{-2}RH + 0.045w - 0.20 \times 10^{-3}RH \\ \times w - 0.315 \times 10^{-4}RH^2 - 0.11 \times 10^{-2}w^2$$

여기서,  $E$ 는 증발산량(mm/day),  $R_s$ 는 일사량(mm/day)이고,  $b$ 는 -0.3 mm/day,  $RH$ 는 상대습도(%),  $w$ 는 풍속(m/sec)이다.

## 2.3 Penman 식

Penman (1948)은 수표면으로부터의 증발량 산정을 위해 수표면에서 발생하는 순복사에너지와 증발표면 위의 공기움직임에 의한 증발효과를 고려하여 물리적 이론에 근거한 증발식 Eq. (8)을 제안하였다.

$$E = \frac{\Delta R_n + E_a}{\Delta + \gamma} = \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (8)$$

$$E_a = f(u_2)(e_s - e_a) = c(a + bu_2)(e_s - e_a) \quad (9)$$

$$f(u_2) = c(a + bu_2) \quad (10)$$

여기서,  $E_p$ 는 Penman식을 이용하여 산정된 증발량(mm/day),  $\frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma}$ 는 Penman 조합식의 에너지항,  $\frac{\gamma E_a}{\Delta + \gamma}$ 는 Penman 조합식의 공기동력항,  $R_n$ 은 순방사(mm/day)이

고,  $v$  는 지상 2 m 높이에서 풍속(m/s),  $e_s$  는 포화증기압(mb),  $e_a$  는 실제증기압(mb),  $(e_s - e_a)$  는 대기의 포화증기압 부족량(mb),  $a$ ,  $b$  그리고  $c$  는 Penman (1956)에 의해서 저수 지로부터의 증발을 고려한 경험적으로 얻어진 계수로서( $a = 0.5, b = 0.54, c = 0.26$ ),  $\Delta$  은 포화증기압과 온도관계 곡선기울기( $\text{mb}/^\circ\text{C}$ ),  $\gamma$  는 건습계 상수( $\text{mb}/^\circ\text{C}$ ),  $a_d$  는 건조력(drying power)항( $\text{mm}/\text{day}$ )이다. 본 연구에서는 순방사( $Q_n$ ,  $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ )를 산정하기 위한 식(Allen et al., 1988)을 적용하였다(Eq. (11)).

$$Q_n = Q_{ns} - Q_{nl} \tag{11}$$

여기서,  $Q_{ns}$  는 순단파복사량( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ )이고, 다음 식으로 산정된다.

$$Q_{ns} = (1 - 0.06) Q_s \tag{12}$$

$Q_{nl}$  은 순장파복사량( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ )이고, 다음 식으로 산정된다.

$$\sigma \left[ \frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 e_a) 1.35 \frac{Q_s}{Q_{so}} - 0.35 \tag{13}$$

여기서  $\sigma$  는 Stefan-Boltzmann 상수( $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/\text{K}^4/\text{m}^2/\text{day}$ )이고,  $T_{\max}$  는 최고 절대온도(K),  $T_{\min}$  는 최저 절대온도(K),  $e_a$  는 실제 증기압(kPa),  $Q_s$  = 일사량( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ ),  $Q_{so}$  는 구름이 끼지 않은 상태의 일사량( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ ) 산정 값이다.

### 2.4 증발량 산정식 검증 및 검증

관측된 증발접시 증발량을 이용하여 일사량 자료에 기초한 증발량 산정식을 유도하기 위해 식의 매개변수를 추정하고 유도된 식의 신뢰도를 검증하였다. 이를 위해 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)지수, 평균절대편향오차(Mean Absolute Error, MABE), 제곱평균오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 산정하였으며, NSE 지수를 이용하여 매개변수를 추정하고 검증하였다. Nash-Sutcliffe (1970) 식은 산정식의 신뢰도를 검증하는데 유용하게 활용되고 있다. NSE 지수는  $-\infty$ 에서 1까지의 범위를 가지며, 지수값 1은 관측값과 모형으로부터 산정된 값이 완전하게 일치함을 의미한다. 0보다 큰 NSE 지수는 모형으로부터 산정된 값이 용인되는 수준이며 반면에 0보다 작은 값은 용인될 수 없는 수준이다(Paul et al., 2011; Mkhwanazi, 2012).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{i,obs} - H_{i,est})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{i,obs} - H_{i,obs})^2} \tag{14}$$

MABE는 0에 가까울수록 본 연구에서 산정된 증발량이 증발접시 증발량과 유사함을 의미한다. MABE는 장기간에 걸쳐서 산정된 결과 값의 신뢰도를 검증하는데 유용하게 활용될 수 있다.

$$MABE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_{i,obs} - H_{i,est}| \tag{15}$$

RMSE는 0에 가까울수록 양호한 식으로서 산정식의 오차는 적은 것으로 간주된다.

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,obs} - H_{i,est})^2 \tag{16}$$

여기서  $H_{i,obs}$  는 관측된  $i$  번째 월의 증발접시 증발량을 나타내며,  $H_{i,est}$  는 증발량 산정식으로 산정된  $i$  번째 월의 증발량을 나타내고,  $H_{i,obs}$  는 전체 검증기간 동안 관측된 자료의 평균값이고,  $n$  은 총 검증자료의 수이다.

## 3. 연구결과

### 3.1 지역별 매개변수 추정

우리나라 6개 기상관측지점에서 관측된 증발접시 증발량과 비교하여 증발량 산정을 위한 Model group 식들의 매개변수를 추정하였다. 또한 Penman (1948) 증발량 산정식을 적용하여 이들 식들과 비교하였다. model group들의 적용성을 평가하기 위해 NSE지수, MABE, RMSE를 산정하여 모형의 적용성을 평가하였으며, 평가결과를 이용하여 model group들의 순위를 정하는 경우 각 평가방법들 간에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 1은 6개 연구지역에서 연구기간 전 자료를 이용하여 매개변수를 추정한 결과를 보여준다. Table 1에서 보여주는 바와 같이 3개의 서로 다른 model group을 적용하여 비교한 결과 6개 지역 모두에서 NSE 지수가 0.663(부산지역 Model group A) 이상을 보여서 양호한 결과를 보였다. 또한 일사량이나 기온 외에 풍속이나 상대습도를 추가로 필요로 하는

**Table 1.** Generalized evaporation equation for radiation based approaches (combined period)

Model group	Evaporation Eqs.	Estimated parameters	Numerical evaluation						
			Mean	Max.	Min.	RMSE	MABE	NSE	
Seoul	A	$E = k \frac{R_s}{\lambda}$	$k=26.30$	93.4	166.4	19.7	20.956	16.727	0.726
	B	$E = (aT_a - b)R_s$	$a=0.00024$ $b=-0.0082$	91.2	176.8	13.8	13.971	9.880	0.878
	C	$E = a \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma} + b$	$a=0.92$ $b=0.37$	92.1	171.5	22.7	13.359	9.536	0.889
	Penman Equation			90.4	179.0	26.5	11.647	8.433	0.916
	pan evaporation			92.1	229.3	27.5			
Daejeon	A	$E = k \frac{R_s}{\lambda}$	$k=21.57$	87.8	169.2	33.1	22.227	17.831	0.712
	B	$E = (aT_a - b)R_s$	$a=0.00022$ $b=-0.0050$	84.9	179.7	21.5	15.228	11.074	0.865
	C	$E = a \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma} + b$	$a=0.83$ $b=0.03$	85.3	181.4	21.6	15.075	10.985	0.868
	Penman Equation			94.5	194.5	22.4	17.626	13.618	0.819
	pan evaporation			85.2	188.6	17.2			
Jeonju	A	$E = k \frac{R_s}{\lambda}$	$k=23.12$	91.2	147.4	37.0	20.840	17.407	0.761
	B	$E = (aT_a - b)R_s$	$a=0.00027$ $b=-0.0030$	88.2	159.1	25.1	9.221	7.404	0.953
	C	$E = a \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma} + b$	$a=0.94$ $b=-0.20$	87.8	161.3	22.0	9.178	7.433	0.954
	Penman Equation			93.8	173.5	27.7	12.674	10.141	0.912
	pan evaporation			87.8	174.6	22.7			
Busan	A	$E = k \frac{R_s}{\lambda}$	$k=23.32$	95.2	162.9	24.7	15.762	11.843	0.663
	B	$E = (aT_a - b)R_s$	$a=0.00009$ $b=-0.0145$	94.7	164.5	22.9	14.713	11.073	0.706
	C	$E = a \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma} + b$	$a=0.59$ $b=1.13$	96.5	154.7	44.9	11.887	8.754	0.808
	Penman Equation			111.2	200.4	49.4	21.696	17.469	0.361
	pan evaporation			96.5	186.6	42.4			
Mokpo	A	$E = k \frac{R_s}{\lambda}$	$k=22.63$	93.9	159.4	30.3	21.104	15.655	0.679
	B	$E = (aT_a - b)R_s$	$a=0.00019$ $b=-0.0075$	91.7	192.4	23.5	16.799	11.998	0.797
	C	$E = a \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma} + b$	$a=0.73$ $b=0.53$	93.5	179.7	34.9	15.775	11.151	0.821
	Penman Equation			106.2	223.0	32.1	21.088	17.269	0.680
	pan evaporation			93.4	207.2	26.1			
Jeju	A	$E = k \frac{R_s}{\lambda}$	$k=26.32$	101.3	186.9	18.4	16.846	13.490	0.823
	B	$E = (aT_a - b)R_s$	$a=0.00014$ $b=-0.0134$	100.0	204.4	16.4	14.979	12.425	0.860
	C	$E = a \frac{\Delta R_s}{\Delta + \gamma} + b$	$a=0.76$ $b=0.82$	102.9	193.6	37.2	11.766	9.080	0.914
	Penman Equation			108.9	213.2	41.6	13.460	10.432	0.887
	pan evaporation			102.8	220.6	34.4			

RMSE: Root Mean Square Error; MABE: Mean Abslue Error; NSE: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient; Mean: average evaporation for the study period; Max: maximum evaporation for the study period; Min: minimum evaporation for the study period

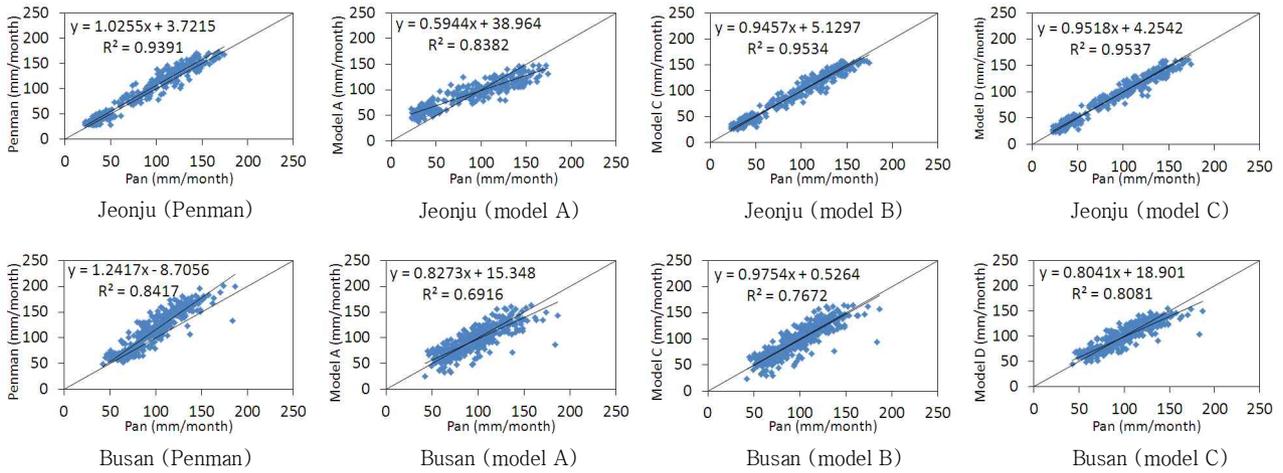


Fig. 1. 1:1 comparisons of pan evaporation versus estimated evaporation (combined period)

Penman 식과 비교할 때 양호한 증발량 산정결과 보였다.

분석결과에 의하면 Makkink (1957)와 Doorenbos and Pruitt (1977) 등에 의해서 제안된 Model group C가 증발접시 증발량을 가장 유사하게 모의하는 것으로 나타났으며, 전주 지역에서 NSE 지수가 0.954를 보였고, 제주(=0.914), 서울(=0.889), 대전(=0.868), 목포(=0.821), 부산(=0.808)의 순으로 나타났다. Model group C는 Penman 조합식의 에너지수지항에서 순방사 대신에 일사량을 적용하고, 그 차이를 보완하기 위해 에너지항에 일정 계수를 곱하고 또한 Penman 식의 공기동력항 대신에 일정 계수를 적용한다. 따라서 Penman 조합식을 적용할 때 필요한 공기동력항 산정을 위한 풍속이나 상대습도 자료를 필요로 하지 않는 장점이 있다. 또한 에너지항과 공기동력항을 대신하여 적용된 계수값이 에너지항과 공기동력항을 어느 정도 설명할 수 있는지에 따라서 식의 적용성이 결정된다고 할 수 있다.

반면에 Abtew (1966)에 의해서 제안된 Model group A를 이용하여 모의된 증발량이 증발접시 증발량과 가장 낮은 유사성을 보였다. Model group A의 경우 제주지역에서 NSE 지수가 0.823을 보였고, 전주(=0.761), 서울(=0.726), 대전(=0.712), 목포(=0.679), 부산(=0.663) 순으로 나타났다. Abtew (1966)에 의해서 제안된 Model group A는 단순히 증발량과 일사량과의 선형적 상관성을 이용하여 증발량을 산정하고자 하는 방법으로 일사량과 증발량의 상관성에 따라서 방법의 적용성이 결정된다고 할 수 있다. 본 연구에서는 대부분의 지역에서 일사량과 증발량사이에 비교적 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

Model group B의 경우 Penman 조합식과 비교할 때 포화증기압과 온도관계 곡선기울기  $(mb/^{\circ}C)$ 와 건습계 상수  $\gamma$

$(mb/^{\circ}C)$ 의 비인  $\Delta/\gamma$ 를 단순히 기온의 함수로서 표현하였다. 또한 에너지항의 경우 순방사대신에 일사량을 적용하고, 풍속과 상대습도 자료를 이용한 공기동력항을 계산하는 대신에 일사량에 일정계수를 곱함으로써 이를 대신하여 표현한 식이다. 따라서 Model group B는 Penman 조합식의 에너지항과 공기동력항을 대치하여 적용된 계수값이 조합식의 에너지항과 공기동력항을 어느 정도 설명할 수 있는지에 따라서 식의 적용성이 결정된다고 할 수 있다.

연구지역별로 분석한 바에 의하면 전반적으로 전주지역이 모든 방법들에서 가장 높은 NSE 지수를 보였고, 반면에 부산지역이 가장 낮은 NSE 지수를 보였다. 전주지역의 경우 Model group A (NSE 지수=0.761)를 제외한 다른 방법들에서 NSE 지수가 0.9 이상을 보였고, Penman 식의 경우 역시 매우 높은 NSE 지수(=0.912)를 보였다. 반면에 부산지역의 경우 단지 Model group C만이 NSE 지수가 0.808을 보였고, 나머지 model group들의 경우 0.8 이하의 NSE 지수를 보였으며, 특히 Model group A의 경우 가장 낮은 NSE 지수(=0.663)을 보였다. Penman 식 역시 매우 낮은 NSE 지수(=0.361)를 보였다.

Fig. 1은 전기간자료를 이용하여 각 model group들의 매개변수를 추정된 후 추정된 매개변수를 이용하여 산정된 증발량과 관측된 증발접시 증발량과의 상관성을 비교하였다. 관측 증발량과 산정된 증발량과의 선형회귀식의 결정계수가 1에 가깝고 절편이 0 그리고 기울기가 1에 가까울수록 증발식이 적절하게 증발량을 산정한다고 할 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이 전주지역이 다른 지역에 비해서 산정된 증발량과 관측된 증발량사이에 가장 밀접한 상관성을 보였고, 반면에 부산지역이 가장 낮은 상관성을 보였다.

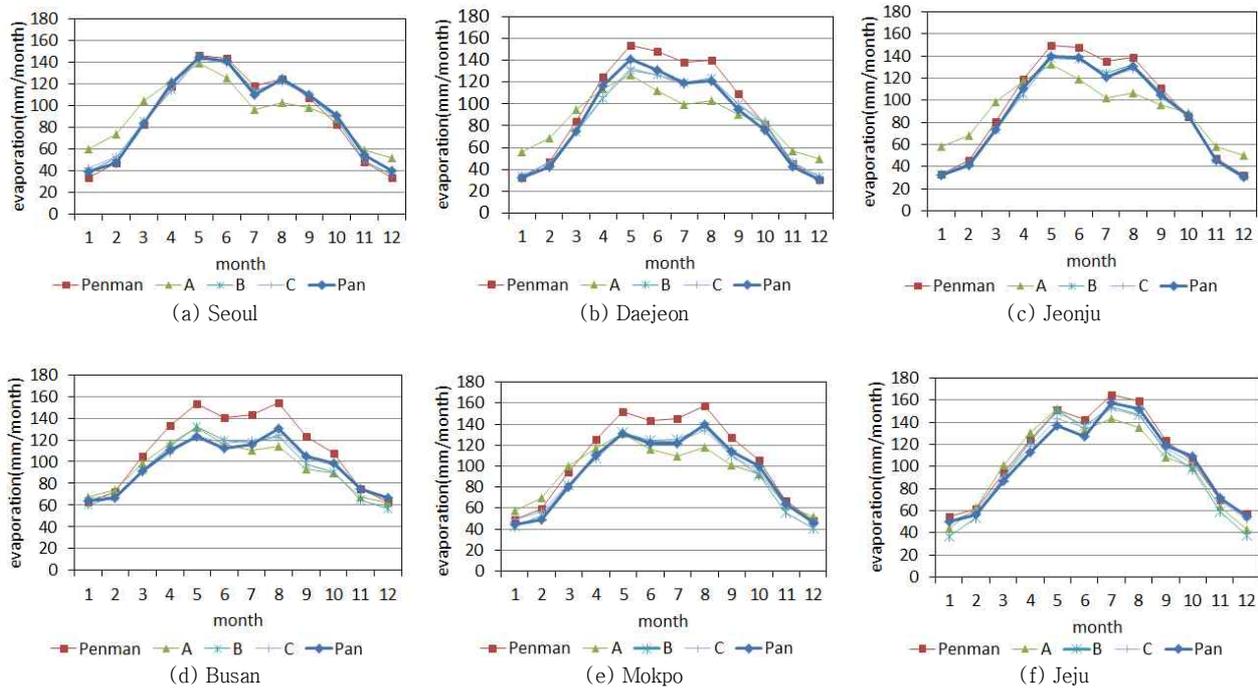


Fig. 2. Comparisons of monthly average evaporations

전주지역의 경우 Model group A의 결정계수가 0.838이고 회귀식의 절편과 기울기는 각각 38.96 mm/month와 0.594를 보여서 증발접시증발량을 0 mm/month로 가정하는 경우 model 적용을 통한 증발량산정에 큰 오차를 발생시켜서, 증발식이 증발량을 적절하게 산정하지 못하고 있음을 알 수 있다.

Model group B는 결정계수(=0.953), 절편(=5.13 mm/month), 기울기(=0.946)을 보였으며, Model group C는 결정계수(=0.954), 절편(=4.25 mm/month), 기울기(=0.952)를 보였다. 따라서 회귀식의 절편과 기울기로 판단했을 때 Model group C가 가장 양호한 결과를 보였다.

부산지역의 경우 Model group A의 경우 결정계수가 0.692이고 회귀식의 절편과 기울기는 각각 15.35 mm/month와 0.827을 보여서 증발접시증발량을 0 mm/month로 가정하는 경우 전주지역과 비교하여 model 적용을 통한 증발량산정에 더 큰 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다. Model group B는 결정계수(=0.767), 절편(=0.526 mm/month), 기울기(=0.975)를 보였으며, Model group C는 결정계수(=0.808), 절편(=18.90 mm/month), 기울기(=0.804)를 보였다.

Fig. 2는 6개 지역에서의 각 model group들의 월별 증발량 분포를 보여준다. 서울, 대전, 전주지역의 경우 Model group A가 겨울철에 증발량을 과다하게 산정하고, 여름철에 증발량을 과소하게 산정하였으나, 다른 model group의 경우 전 월에 걸쳐서 대체로 양호한 증발량 모의결과를 보였다. Penman 식

의 경우 적용된 model들과 비교하여 여름철에 특히 증발량이 과다하게 산정되는 것으로 나타났다.

### 3.2 증발량 산정식의 적합성 평가

Table 2와 3은 일사량자료에 기초한 식들의 적용성을 검증하기 위해 연구기간을 전반기와 후반기 자료로 구분하여 후반기 자료를 이용하여 model의 매개변수를 검정하고, 전반기 자료를 이용하여 model 검증을 실시하였다. Table 2에서 보여주는 바와 같이 model의 매개변수 검정기간의 경우 모든 지역에서 모든 model group들의 NSE 지수가 0.745 이상을 보여서 만족스러운 증발량 모의 결과를 보였다. 모든 지역에서 Model group C가 가장 높은 NSE 지수를 보여서 증발량 산정을 위해 가장 적용성이 큰 것으로 나타났다. 반면에 Model group A의 경우 NSE 지수가 모든 지역에서 가장 낮게 나타나서, 일사량과 증발량과의 선형적 상관성을 바탕으로 한 증발량산정방법이 다른 방법들과 비교하여 상대적으로 증발량산정에 있어서 한계가 있는 것으로 나타났다.

예상한 바와 같이 model 검정기간의 NSE 지수와 비교하여 model 검증기간의 NSE 지수가 상대적으로 작은 값을 보였다. Model group A의 경우 NSE 지수가 제주에서 0.773으로 최대값을 보였고, 부산에서 0.526로 최소값을 보였다. Model group B의 경우 전주에서 0.934로 최대값을, 부산에서 0.567로 최소값을 보였다. Model group C의 경우 전주에서 0.928로

**Table 2.** Calibration for radiation based approaches (model calibration period)

Model group	Estimated parameters	Numerical evaluation			Model group	Estimated parameters	Numerical evaluation				
		RMSE	MABE	NSE			RMSE	MABE	NSE		
Seoul	A	$=26.62$	19.932	16.172	0.760	Daejeon	A	$k=19.89$	19.745	17.109	0.761
	B	$a=0.00024$ $b=-0.0083$	12.287	9.081	0.909		B	$a=0.00022$ $b=-0.0036$	10.153	8.036	0.937
	C	$a=0.96$ $b=0.26$	12.138	8.772	0.911		C	$a=0.84$ $b=-0.28$	9.517	7.470	0.945
Jeonju	A	$k=22.51$	21.529	18.235	0.745	Busan	A	$k=22.38$	13.025	10.502	0.761
	B	$a=0.00028$ $b=-0.0018$	8.044	6.198	0.964		B	$a=0.00009$ $b=-0.0136$	11.820	9.562	0.803
	C	$a=0.96$ $b=-0.37$	7.665	5.805	0.968		C	$a=0.60$ $b=0.97$	10.468	7.995	0.846
Mokpo	A	$k=21.70$	17.521	13.887	0.777	Jeju	A	$k=25.11$	15.813	12.778	0.840
	B	$a=0.00020$ $b=-0.0061$	10.692	8.594	0.917		B	$a=0.00015$ $b=-0.0116$	13.406	11.021	0.885
	C	$a=0.77$ $b=0.23$	10.308	8.235	0.923		C	$a=0.74$ $b=0.74$	10.765	8.229	0.926

RMSE: Root Mean Square Error; MABE: Mean Abslue Error; NSE: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient

**Table 3.** Verification for radiation based approaches (model verification period)

Model group	Numerical evaluation						Model group	Numerical evaluation							
	Mean	Max.	Min.	RMSE	MABE	NSE		Mean	Max.	Min.	RMSE	MABE	NSE		
Seoul	A	92.9	168.4	19.9	22.046	17.406	0.685	Daejeon	A	77.2	128.9	30.5	26.699	19.962	0.595
	B	89.4	174.6	13.9	15.576	10.737	0.843		B	74.4	162.4	19.9	21.754	16.031	0.731
	C	90.1	172.4	19.8	14.692	10.136	0.860		C	89.7	176.6	30.8	14.914	9.588	0.874
	PM	87.6	169.3	26.5	11.866	8.633	0.909		PM	90.3	193.7	26.1	12.937	8.908	0.905
	pan	89.9	182.2	27.5					pan	89.8	188.6	27.1			
Jeonju	A	87.4	141.4	36.1	20.461	16.905	0.770	Busan	A	88.1	150.8	23.7	18.979	13.716	0.526
	B	83.9	155.7	23.6	10.964	8.915	0.934		B	87.1	155.6	21.8	18.129	13.608	0.567
	C	83.0	158.5	17.4	11.450	9.484	0.928		C	90.3	150.3	40.7	14.243	10.410	0.733
	PM	90.4	170.1	27.7	10.802	8.199	0.936		PM	109.1	200.4	49.4	18.775	14.980	0.536
	pan	89.2	168.7	26.1					pan	97.9	183.4	42.4			
Mokpo	A	87.4	148.7	29.1	24.826	17.142	0.556	Jeju	A	92.8	163.2	21.3	19.309	15.692	0.773
	B	85.4	175.3	21.9	21.939	15.214	0.654		B	90.9	181.1	17.9	18.091	15.448	0.801
	C	86.3	168.4	26.6	21.033	14.116	0.682		C	95.2	174.1	35.8	14.316	11.102	0.875
	PM	105.1	201.2	43.4	20.992	17.119	0.683		PM	105.4	194.0	41.6	9.869	7.861	0.941
	pan	95.8	207.2	36.8					pan	104.5	217.7	40.5			

PM: Penman; RMSE: Root Mean Square Error; MABE: Mean Abslue Error; NSE: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient; Mean: average evaporation for the study period; Max: maximum evaporation for the study period; Min: minimum evaporation for the study period

최대값을, 목포에서 0.682로 최소값을 보였다. 부산지역에 적용된 Model group C를 제외하고 다른 연구지역에 적용된 다른 model group의 경우 Penman식보다 낮은 NSE 지수를 보였다. 따라서 기온, 풍속, 상대습도, 일사량 등 증발량 산정에 필요한 주요 기상요소 모두가 적용되는 Penman식과 비교하여

일사량과 기온자료만을 적용하여 증발량을 산정하는 방법은 주요 기상자료 일부(풍속, 상대습도)가 부족하거나 측정되지 않는 경우 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 3에서는 6개 연구지역에서 관측된 증발량과 3개 model group으로부터 산정된 증발량사이에 단순 선형회귀식을 도

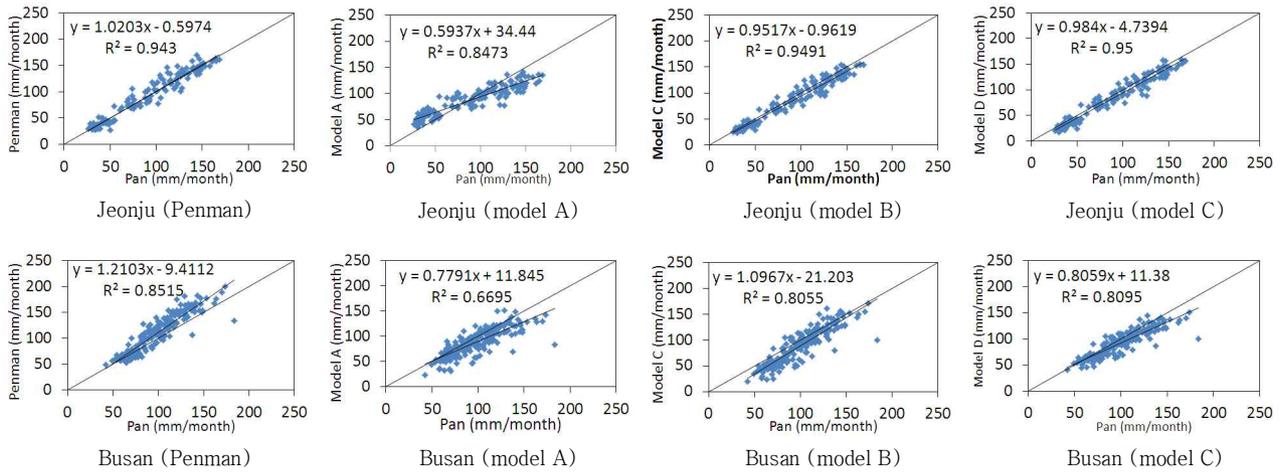


Fig. 3. 1:1 comparisons of pan evaporation versus estimated evaporation (verification period)

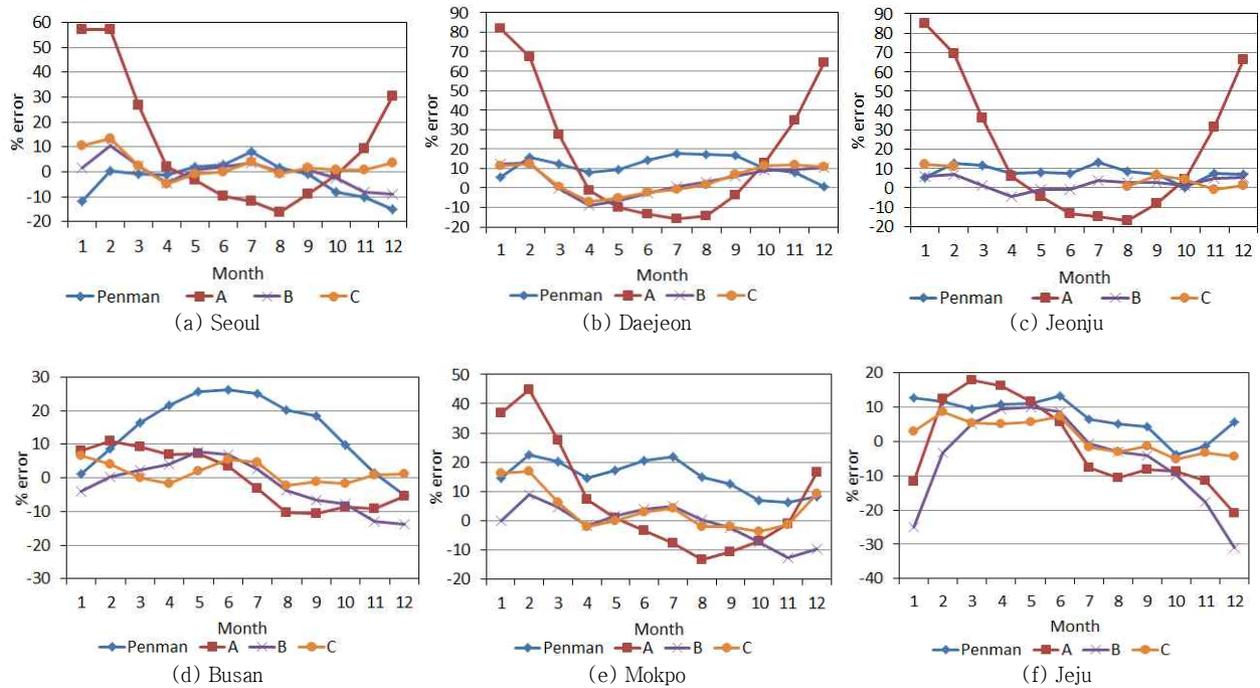


Fig. 4. Comparisons of monthly mean percentage error for radiation based approaches

출하고, 상관관계를 분석하였다. 분석결과에 의하면 전주지역이 가장 양호한 상관관계를 보였고, 반면에 부산지역이 가장 낮은 상관성을 보였다. 전주지역에서 Model group A의 경우 결정계수가 0.847이고 회귀식의 절편이 34.44 mm/month를 보여서 관측된 증발량을 0 mm/month로 가정하는 경우 model 적용을 통한 증발량산정에 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다. 반면에 다른 model group의 경우 회귀식의 절편이 작아서 증발량을 모의하는데 비교적 오차가 적게 나타났다. 부산지역의 경우 전주지역과 비교하여 Model group A를 제

외하고 절편의 절대값이 크게 나타나서 model 적용을 통한 증발량산정에 오차가 비교적 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. Model group A의 경우 결정계수가 0.670이고 회귀식의 절편이 11.85 mm/month이었으며, Model groups B, C의 경우 각각 21.20 mm/month와 11.38 mm/month로서 전주지역보다 큰 회귀식의 절편을 보였다.

6개의 연구지역들에서 각 증발량 산정방법들을 적용하는 경우 실제 증발량과 산정된 증발량의 평균 백분위오차를 비교분석하였다(Fig. 4). Model group A의 경우 다른 model

group과 비교하여 전체 연구지역에서 가장 큰 평균 백분위오차를 보였으며 특히 겨울철의 경우 다른 계절과 비교하여 큰 오차를 보였다. 또한 일부 월(주로 여름철)에서는 음의 평균 백분위오차를 보인 반면에 일부 월(주로 겨울철)에서는 양의 평균 백분위오차를 보였다. 이는 월별 일사량변화와 월별 증발량변화의 차이에 따른 결과라 할 수 있다. Model group A의 경우 단지 일사량과 증발량과의 선형 상관성을 이용하여 증발량을 산정하고자 하는 방법으로 겨울철의 경우 단지 일사량자료만으로 증발량을 산정하는 것은 많은 오차를 발생시키는 것으로 판단된다. 전반적으로 Model group C가 전체 월에 걸쳐서 가장 작은 평균 백분위오차를 보였다. Model group C의 경우 전월에 걸쳐서 평균 백분위오차가 0%를 중심으로 크거나 혹은 작은 값을 보여서, 전반적으로 계절적인 변화가 없는 것으로 나타났다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 일사량자료에 기초한 식이 적용되었다 (e.g., Abtew, 1996; Jensen and Haise, 1963; Hargreaves, 1975; Stephens and Stewart, 1963; McGuinness and Bordne, 1972; Makkink, 1957; Doorenbos and Pruitt, 1977). 이 식들을 형태에 따라서 3개의 Model groups A, B, C로 구분하였고, 식들의 적용성 검토를 위해 우리나라 6개 기상관측지점에서 산정된 증발량과 증발접시 증발량과의 비교를 통해 매개변수를 추정하고 이를 검증하였다. 또한 Penman (1948)의 조합식을 적용하여 각각의 Model group과 비교하였다.

연구결과에 의하면 Makkink (1957)와 Doorenbos and Pruitt (1977) 등에 의해서 제안된 형태의 식인 Model group C가 증발접시 증발량을 가장 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 6개 다른 연구지역(서울, 대전, 전주, 부산, 목포, 제주) 중에서 전주지역의 NSE 지수가 0.954를 보여서 가장 양호한 증발량 모의결과를 보였고, 제주(=0.914), 서울(=0.889), 대전(=0.868), 목포(=0.821), 부산(=0.808)의 순으로 나타났다. 반면에 Abtew (1966)에 의해서 제안된 식을 적용하여 산정된 증발량의 경우 상대적으로 증발접시 증발량과 가장 낮은 유사성을 보였다. 하지만 증발접시 증발량과 산정된 증발량과의 상관성을 분석한 바에 의하면 6개 연구지역에서 일사량과 증발량사이에 비교적 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

model group들의 적용성을 검증하기 위해 연구기간을 전반기와 후반기 자료로 구분하여 후반기 자료를 이용하여 model의 매개변수를 검정하고, 전반기 자료를 이용하여

model 검증을 실시하였다. model의 매개변수 검정기간의 경우 모든 지역의 모든 model group들에서 NSE 지수가 0.745 이상을 보여서 만족스러운 증발량 모의 결과를 보였으며, 모든 지역에서 Model group C가 가장 높은 NSE 지수를 보여서 증발량 산정을 위해 가장 적용성이 큰 것으로 나타났다. model 검증기간의 NSE 지수는 model 검정기간과 비교하여 NSE 지수가 작은 값을 보였으나 모든 지역의 모든 model group들에서 NSE 지수가 0.526 이상을 보여서 만족스러운 결과를 보였다.

model 검증결과 6개 연구지역 중 부산지역을 제외한 다른 5개 연구지역(서울, 대전, 전주, 목포, 제주)에서 적용된 model group들의 증발량 모의결과가 Penman식과 비교하여 작은 NSE 지수를 보였다. 주요 기상요소(기온, 풍속, 일사량, 상대습도) 모두가 적용되는 Penman 식 적용 결과보다는 NSE 지수가 다소 떨어지지만 전반적으로 일사량 기반 증발량 산정식 적용 결과가 양호하였다. 따라서 주요 기상자료 일부가 부족한 경우 이를 대체하여 증발량을 산정하는 경우에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2015학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

#### References

- Abtew, W. (1996). "Evapotranspiration measurement and modeling for three wetland systems in South Florida." *Water Resources Bulletin*, Vol. 32, pp. 465-473.
- Allen, R.G., Peretira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper 56, FAO, ISBN 92-5-104219-5.
- Blaney, H.F., and Criddle, W.D. (1950). *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. U.S. Dept. Agriculture, Soil Conserv. Service, Tech. Paper 96, p. 48.
- Brutsaert, W.H., and Stricker, H. (1979). "An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vo. 15, pp. 443-450.
- Dalton, J. (1802). "Experimental essays on the constitution of mixed gases: on the force of steam or vapour from water or other liquids in different temperatures, both in a Torricelli vacuum and in air; on evaporation; and on expansion of

- gases by heat." *Manchester Lit. Phil. Soc. Mem. proc.*, Vol. 5, pp. 536-602.
- DeBruin, H.A.R. (1978). "A simple model for shallow lake evaporation." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 17, pp. 1132-1134.
- DeBruin, H.A.R., and Keijman, J.Q. (1979). "The Priestley-Yaylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands", *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 18, pp. 898-903.
- Delclaux, F., Coudrain, A., and Condom, T. (2007). "Evaporation estimation on lake Titicaca: a synthesis review and modelling." *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 1664-1677.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. (1977). *Crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agricultural Organization of the United Nations: Rome, Italy pp. 144.
- Gianniou, S.K., and Antonopoulos, V.Z. (2007). "Evaporation and energy budget in lake Vegoritis Greece." *Journal of Hydrology*, Vol. 345, pp. 212-223.
- Han, J.S., and Lee, B.Y. (2006). "Measurement and analysis of free water evaporation at HaeNam paddy field." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 7, No. 1, pp. 92-98.
- Hargreaves, G.H. (1975). "Moisture availability and crop production." *Transactions of the ASAE*, Vol. 18, pp. 980-984.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1982). "Estimating potential evapotranspiration." *J. Irrig. and Drain Engr., ASCE*, Vol. 108(IR3), pp. 223-230.
- Hargreaves, G.H., and Samni, Z.A. (1985). "Reference crop evapotranspiration from temperature." *Transaction of ASCE*, Vol. 1, No. 2, pp. 96-99.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: the physical science basis*. Working Group 1. Cambridge University Press: Cambridge.
- Jensen, M.E., and Haise, H.R. (1963). *Estimation of evapotranspiration from solar radiation*. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 89, pp. 15-41.
- Jensen, M.E. (1973) *Consumptive use of water and irrigation requirements*. ASAE, New York.
- Jo, H.G. (1973). "On lake evaporation from climatological data in Korea." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 6, No. 1, pp. 5-12.
- Kohler, M.A., Nordenson, T.J., and Fox, W.E. (1955). *Evaporation from pans and lakes*. U.S. Dept. Commerce Research. Paper. No. 38.
- Kohler, M.A., and Richards, M.M. (1962). "Multicapacity basin accounting for predicting runoff from storm precipitation." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 67, pp. 5187-5197.
- Konstantinov, A.R. (1968). *Evaporation in nature*. Leningrad.
- Lagos, L.O. Martin, D.L., Verma, S.B., Irmak, S., Irmak, A., Eisenhauer, D., and Suyker, A. (2011). "Surface energy balance model of transpiration from variable canopy cover and evaporation from residue-covered or bare soil systems: model evaluation." *Irrigation Science*, DOI: 10.1007/s00271-011-0298-9.
- Lee, K.H., and Kim, M.I. (1985). "Seasonal variations of the evaporation in Korea." *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, Vol. 18, No. 3, pp. 243-251.
- Lenters, J.D., Kratz, T.K., and Bowser, C.J. (2005). "Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin(USA)." *Journal of Hydrology*, Vol. 308, pp. 268-195.
- Makkink, G.F. (1957). "Testing the Penman formula by means of lysimeters." *Journal of the Institution of Water Engineers*, Vol. 11, pp. 277-288.
- McGuinness, J.L. and Bordne, E.F. (1972). *A comparison of Lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values*. Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture: Washington, DC; pp. 71.
- Mkhwanazi, M., Chavez, J.L., and Rambikur, E.H. (2012). "Comparison of Large aperture scintillometer and satellite-based energy balance models in sensible heat flux and crop evapotranspiration determination." *International Journal of Remote Sensing Applications*. Vol. 12, pp. 24-30.
- Monteith, J.L. (1965). "Evaporation and environment." *Symp. Soc. Exp. Biol.*, Vol. 19, pp. 205-234.
- Nash J.E., and Sutcliffe J.V. (1970) "River flow forecasting through conceptual models, 1. A discussion of principles." *J. of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Papadakis, J. (1961). *Climate tables for the world*. Publ. by Author, Buenos Aires, p.175.
- Paul, G., Gowda, P.H., Prasad, V., Howell, T.A., and Staggenborg, S.A. "Evaluating surface energy balance system(SEBS) using aircraft data collected during BEAREX07." World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing knowledge for sustainability, pp. 2777-2786.
- Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193, pp. 120-146.
- Penman, H.L. (1956). "Evaporation. An introductory survey." *Neth. J. Agric. Sci.* Vol. 4, pp. 9-29.
- Prestley, C.H.B., and Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, No. 2, pp. 81-92.
- Rohwer, C. (1931). *Evaporation from free water surfaces*. USDA Technical Bulletin No. 271.
- Shuttleworth, W.J. and Wallace, J.S. (1985). "Evaporation from sparse crops-an energy combination." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 111, pp. 839-855.
- Stephens, J.C., and Stewart, E.H. (1963). *A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration*. Publication 62, International Association of Scientific Hydrology. International Union of Geodynamics and Geophysics, Berkeley, pp. 123-133.
- Thornthwaite, C.W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate." *Geog. Rev.*, Vol. 38, pp. 55-94.